Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 6985F

Économies d'énergie dans les navires actuels et futurs

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports
Transports Canada

par
Melville Shipping Ltd.

AOÛT 1985

CA1
DTC 849
85
E51SZ
c.2

Canada

88-00282/

TP 6985F

ÉCONOMIES D'ÉNERGIE DANS LES NAVIRES ACTUELS ET FUTURS

Library and Archives Canada
Bibliothèque et Archives Canada
RECEIVED
JUL 17 1987

par

R.A. Dick
E.W. Thompson
M. Kalsiak
P. Wyld

Melville Shipping Ltd.

Août 1985

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles du contractant et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English under the title: "Energy Conservation in Present and Future Ships", TP 6985E.

ÉQUIPE D'ÉTUDE

L'équipe d'étude mise sur pied par Melville Shipping Ltd. était formée de:

M. P.J. Wyld
M. E.W. Thompson
M. M. Kalisiak
M. K. Leung
M. R.A. Dick

Le Centre de développement des transports était représenté par M. R. Bertrand.

Transports Canada / Transport Canada

Développement / Development

FORMULE DOCUMENTAIRE DU RAPPORT

1. N° du rapport Transports Canada	2. N° de l'étude — CDT	3. N° de catalogue du destinataire
TP 6985F	4937	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Economies d'énergie dans les navires actuels et futurs	Août 1985
	6. N° du rapport de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. N° de dossier Transports Canada
R.A. Dick, E.W. Thompson, M. Kalisiak, P. Wyld	D 1460-200

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. N° de dossier — ASC
Melville Shipping Ltd. 350 Sparks St., Suite 1007 Ottawa, Ontario K1R 7S8	T 8200-2-2591
	11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada OSD83-00010

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy-Favreau, 200 o. boul. Dorchester Suite 601, tour ouest Montréal, Québec H2Z 1X4	Sommaire; août 1985
	14. Code de l'organisme parrain 4937

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
Sommaire de "Energy Conservation in Present and Future Ships", TP 6855E.	R. Bertrand

17. Resumé

Ouvrage de référence constituant un compendium sur les techniques présentes et futures en matière d'économie d'énergie à bord des navires. L'information fournie concerne: les combustibles (qualités et équipements), les installations motrices, le système propulsif, les systèmes auxiliaires, la résistance à l'avancement du navire, l'exploitation du navire, les mesures d'économie d'énergie appliquées à bord de divers navires canadiens, les combustibles et les installations motrices de l'avenir ainsi que l'évolution future des systèmes et des équipements de propulsion. De plus, il traite des technologies actuelles et futures, en général, et de leurs utilisations sur les navires canadiens, en particulier.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Rendement énergétique, architecture navale, exploitation de navires.	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
non classifié	non classifiée	33	-

Transport Canada / Transports Canada

Development / Développement

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 6985F	4937	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Economies d'énergie dans les navires actuels et futurs	August 1985
	6. Performing Organization Report No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
R.A. Dick, E.W. Thompson, M. Kalisiak, P. Wyld	D 1460-200

9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Melville Shipping Ltd. 350 Sparks St., Suite 1007 Ottawa, Ontario K1R 7S8	T 8200-2-2591
	11. DSS or Transport Canada Contract No.
	OSD83-00010

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) Guy Favreau Complex, 200 Dorchester Blvd. West Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	Summary; August 1985
	14. Sponsoring Agency Code
	4937

15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
Summary of "Energy Conservation in Present and Future Ships", TP 6855E.	R. Bertrand

17. Abstract

This reference document provides a summarized compendium of information on current practice and potential future developments in the area of energy conservation on ships. It presents information on fuel quality and equipment, propulsion power systems, thrust system, auxiliary systems, ship resistance, ship operation, the application of fuel efficiency measures to various Canadian ships, future fuels and power sources, and future propulsion systems and equipment. It discusses existing technology and future developments with special reference to the application of this technology to Canadian vessels.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Energy efficiency, ship design, ship operations.	Limited number of copies available from Transportation Development Centre.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	33	nil

TDC CDT 79-005
Rev 86

Canada

REMERCIEMENTS

Nous désirons exprimer notre reconnaissance à M. R. Bertrand, du Centre de développement des transports, pour l'aide et l'assistance qu'il nous a prodiguées, et dont le soutien et les critiques constructives ont été pour beaucoup dans la réalisation de cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES	2
3.	INSTALLATIONS MOTRICES	3
4.	SYSTÈMES PROPULSIFS	5
5.	MACHINES AUXILIAIRES	7
6.	RÉSISTANCE À LA MARCHE	9
7.	EXPLOITATION DU NAVIRE	10
8.	APPLICABILITÉ AUX NAVIRES MARCHANDS CANADIENS	11
9.	COMBUSTIBLES ET SOURCES D'ÉNERGIE DE L'AVENIR	16
10.	SYSTÈMES ET APPAREILS PROPULSIFS DE L'AVENIR	22

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Liste des mesures d'économies d'énergie envisageables et applicabilité à la marine marchande du Canada	12
Tableau 2	Classement qualitatif des combustibles et des sources d'énergie de substitution	17

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Classement des combustibles selon le coût de production	19
Figure 2	Rendement thermique global (Rapport entre l'énergie potentielle à la source et la puissance disponible sur l'arbre d'une turbine à vapeur)	20
Figure 3	Classement des sources d'énergie en fonction du coût de production d'énergie électrique	21

1. INTRODUCTION

Jusqu'en 1973, le poste "Combustibles" entrait pour moins de 8 p. 100 dans les coûts d'exploitation d'un navire. Or, depuis cette année-là, le coût du pétrole n'a cessé d'augmenter, pour atteindre sept fois son prix d'avant 1973, de sorte que ce poste occupe maintenant plus de 30 p. 100 des coûts d'exploitation. Qui plus est, de nombreuses analyses prédisent que les ressources de pétrole naturel commenceront à s'épuiser, d'ici à la fin du 20ième siécle. Cette conjoncture a déclenché un mouvement général vers un accroissement du rendement énergétique des navires.

Le présent rapport concerne l'étude faite par la Melville Shipping Ltd. (Melville) dans le cadre de la recherche à frais partagés entreprise avec le Centre de développement des transports, CDT, et dont le principal objectif était de passer en revue la technologie des navires à consommation améliorée et de dégager les techniques qui connaîtront un développement plus ou moins assuré. Cette étude est plus particuliérement destinée aux armateurs et aux constructeurs navals, dont elle se veut un guide dans le choix de l'appareil moteur des navires, ainsi qu'aux services du gouvernement chargés d'encourager la recherche et le développement dans le domaine maritime.

La démarche suivie dans la présentation du rapport s'est voulue logique: celui-ci commence par un tour d'horizon des procédés mis en oeuvre pour le traitement des combustibles que brûlent les moteurs modernes et l'alimentation de ces derniers, ainsi que des installations motrices, des appareils propulsifs et des systèmes auxiliaires. Viennent ensuite la résistance à la marche, les diverses méthodes d'exploitation possibles et la recherche concernant l'application des méthodes envisagées aux différents types de navires qui forment l'essentiel de la flotte commerciale du Canada. Enfin, il montre la voie que devraient suivre la recherche et le développement, notamment dans le domaine des différentes formes d'énergie utilisables ainsi que dans le choix des installations motrices qui conviendront le mieux à chacune d'elles.

2. PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES

Depuis plusieurs années, on a constaté que d'importants changements se sont produits dans la qualité des combustibles disponibles et dans les méthodes d'exploitation des navires. Pour ce qui est des combustibles, voici les résultats observés aujourd'hui:

- les densités dépassent maintenant l'unité
- la présence généralisée de résidus de catalyse
- la séparation plus aisée des asphaltènes
- une mise en émulsion dans l'eau plus rapide

Toutes ces caractéristiques peuvent, si le combustible n'est pas traité en conséquence, aggraver considérablement l'usure des moteurs. Un effort concerté a porté sur la mise au point de procédés qui tiennent compte de ces facteurs. Étant donné que le procédé d'épuration des gas-oils pour moteurs diesel a depuis longtemps été celui de la séparation centrifuge faite à bord, la recherche a voulu trouver d'autres méthodes que celle-là. Plusieurs fabricants et armateurs ont essayé l'homogénéisation et le filtrage, tandis que d'autres sont allés jusqu'à se défaire des séparateurs tout à fait.

Néanmoins, et malgré les avantages que l'on a pu trouver à ces nouvelles méthodes, plusieurs ouvrages et revues techniques de publication récente sont revenus à la séparation centrifuge, s'accordant à dire que tous les navires équipés de moteurs diesel modernes brûlant des gas-oils lourds devraient avoir à bord trois séparateurs centrifuges; tous les autres procédés de traitement devraient venir en surplus, comme moyen d'améliorer la qualité du combustible déjà épuré par centrifugation.

La mise en oeuvre de procédés bien conçus concernant le traitement des combustibles, intégrant les perfectionnements récemment mis au point et exploités selon des méthodes appropriées, devrait permettre de réaliser d'importantes économies de consommation.

3. INSTALLATIONS MOTRICES

À l'heure actuelle, les navires marchands en exploitation à travers le monde sont presque toujours motorisés au moyen de l'un des trois types d'installations motrices suivantes: moteur diesel lent à attaque directe de la ligne d'arbres, moteur diesel semi-rapide muni d'un réducteur de vitesses à engrenages ou turbine à vapeur munie d'un réducteur de vitesses.

Avant la crise du pétrole, le développement de ces installations motrices portait sur leur entretien, l'automatisation de la conduite et le fonctionnement sans surveillance. Mais la spirale des coûts pétroliers a forcé les motoristes à répondre à une forte demande pour des moteurs ayant un rendement énergétique élevé. Ce rendement s'est, en effet, considérablement amélioré depuis quelques années. On trouve maintenant des moteurs diesel lents dont la consommation spécifique n'est plus que de 180 g/kWh et qui tombera encore plus lorsque les nouveaux modèles sortiront.

On trouve aussi des moteurs diesel semi-rapides dont le poids et l'encombrement ont été réduits et qui permettent de donner au système propulsif la vitesse de rotation optimale voulue en jouant sur la réduction des vitesses; ces derniers sont également capables de brûler des combustibles lourds et donc moins chers. Ce type de moteurs se présente comme un concurrent sérieux au moteur diesel lent, malgré une consommation spécifique de quelque 10 p. 100 supérieure.

Des gains de consommation ont pu être réalisés en améliorant les techniques de combustion et de balayage des gaz et en adoptant des turbocompresseurs à rendement élevé. Les solutions les plus remarquables ont été la turboalimentation à pression constante et le balayage "uniflow" ou équicourant, solutions bien connues dans le passé, mais dont la supériorité sur les autres techniques a été confirmé par de récentes analyses assistées par ordinateur.

Pour achever le tableau des améliorations au moteur diesel faites depuis peu, citons l'injection à des pressions pouvant atteindre 1 200 bars donnant des gouttelettes de 20 microns de diamètre, l'étude de nouvelles soupapes d'échappement et leur régulation, ainsi que des soupapes de combustible, ainsi que de nombreux autres détails, souvent infimes. De tels moteurs se prêtent beaucoup mieux à un fonctionnement sous faible charge et peuvent apporter de

sérieuses économies de combustible sur certaines routes où une marche lente est imposée.

De même, les turbines à vapeur se sont, elles aussi, beaucoup améliorées du point de vue de la conception et de la consommation, bien que leur rendement énergétique reste inférieur aux moteurs diesel, notamment sous charges partielles.

4. SYSTÈMES PROPULSIFS

Le rendement propulsif d'un navire dépend non seulement du rendement des éléments intérieurs tels que moteurs et transmissions, mais aussi, et à un degré égal, des éléments extérieurs tels que le système propulsif et les appendices de coque. C'est ainsi que l'hélice classique à pas fixe, travaillant dans un sillage uniformisé grâce à une hydrodynamique étudiée de la partie arrière du navire, évolue maintenant vers des rendements de plus en plus élevés tout en s'adaptant à certains phénomènes hydrodynamiques récemment découverts.

Le rendement propulsif d'une hélice repose sur cinq critères:

a) le diamètre (relation directe)
b) le nombre de tours (relation inverse)
c) le nombre de pales, également en relation inverse
d) la surface des pales, le rendement étant d'autant plus élevé que les surfaces sont petites et
e) la rugosité de surface des pales, les gains étant d'autant plus élevés que les surfaces sont lisses.

De toutes ces solutions, les plus prometteuses en gains sont le nombre de tours (et, donc, le diamètre), le nombre de pales et la rugosité de surface.

Outre les hélices classiques, ont été utilisées les hélices à pales sans tourbillons d'extrémité, les hélices contra-rotatives et les hélices de type "reaction fin", toutes caractérisées par une hydrodynamique améliorée et apportant de sérieux gains de consommation. Mais on n'est pas encore très renseigné, ni sur leurs vrais avantages à long terme, ni sur les types de navires auxquels elles pourraient convenir le mieux.

Les hélices fonctionnant dans une tuyère existent depuis longtemps, équipant surtout les navires devant développer une force de traction au point fixe élevée ou ceux dont la marche est généralement lente. Le gain de rendement des hélices à tuyère aux faibles vitesses est bien connu, de même que leurs inconvénients lorsqu'elles doivent donner une poussée correspondant aux vitesses normales de 14 à 16 noeuds. D'autres options intéressantes du point de vue de la consommation existent, se présentant sous la forme d'appendices de la coque. Citons l'hélice à tuyère intégrée de Mitsui (Mitsui Integrated Duct Propeller), l'hélice sous voûte et les bulbes de gouvernail. Les premiers résultats

concernant les économies apportées par ces appendices ont été très intéressants, mais il faudra sans doute attendre qu'ils soient confirmés à plus long terme pour que leur emploi puisse commencer à se généraliser.

5. MACHINES AUXILIAIRES

Les auxiliaires peuvent concourir à d'importantes économies d'énergie, s'ils ont été bien conçus et bien utilisés, les gains les plus importants venant des machines génératrices d'électricité.

Le fonctionnement des génératrices classiques entraînées soit par un moteur diesel, soit par une turbine à vapeur, est aujourd'hui plus efficace que dans le passé en raison de la plus grande efficacité des machines motrices modernes. Les plus importantes économies réalisables viendraient de l'utilisation de la machine principale du navire, qui donne généralement le meilleur rendement, pour la production de toute l'énergie électrique nécessaire à bord. Cela peut se faire, soit par la récupération des calories perdues et la mise à contribution de celles-ci pour faire fonctionner le groupe électrogène, soit par l'accouplement de celui-ci à la machine principale.

L'utilisation de génératrices entraînées par la machine principale est une technique très répandue, surtout dans le cas des navires équipés de moteurs diesel semi-rapides entraînant une hélice à pas variable; cela s'explique du fait que les génératrices sont des machines à vitesse constante et qu'il est possible de faire tourner les hélices à pas variable à un nombre de tours/minute constant, sans égard à la charge. Il est cependant impossible de réaliser cela dans le cas des moteurs diesel lents entraînant des hélices à pas fixe, à moins de prévoir des convertisseurs de fréquence qui sont généralement très onéreux. D'ailleurs, l'encombrement, et donc le coût, d'une génératrice entraînée par un moteur diesel lent devient excessif, à moins d'intercaler des engrenages multiplicateurs.

L'autre manière d'économiser l'énergie consiste à récupérer la chaleur dégagée par les machines motrices, à l'aide d'un dispositif adéquat. La chaleur à récupérer est contenue dans les gaz d'échappement, l'eau de refroidissement des machines et l'air ambiant de la salle des machines. La récupération sur les gaz d'échappement, surtout dans le cas des navires de fort tonnage, sert principalement à la production d'électricité au moyen de turbo-alternateurs à vapeur. Quant aux autres sources de récupération, elles servent surtout à recycler la chaleur à des fins diverses de chauffage. Par l'adoption de nouveaux systèmes de récupération thermique, tels que les générateurs de vapeur à double pression, l'efficacité globale de la technique a considérablement augmenté, à tel point que les armements

peuvent tirer d'un navire neuf un rendement financier plus intéressant sur les investissements qu'ils ont consentis dans ce domaine. Un investissement relativement modeste permet de réaliser d'importantes économies d'énergie, mais l'importance des investissements à consentir augmente considérablement à mesure que la quantité de chaleur à récupérer augmente.

L'option de la récupération thermique est très intéressante, d'autant plus que, une fois le coût de premier établissement absorbé, il n'y a d'autres frais à engager que le coût de l'entretien.

6. RÉSISTANCE À LA MARCHE

La résistance à la marche d'un navire peut être réduite en diminuant:

a) la résistance de frottement due au déplacement de la coque dans l'eau et
b) la résistance résiduelle formée par la résistance de vagues résultant de l'énergie dépensée dans la formation de vagues accompagnant le navire dans son déplacement et de la résistance de remous se produisant à l'arrière du navire.

Il a été démontré que ces résistances ont une influence considérable sur la consommation; les recherches visant à réduire la résistance de frottement et à affaiblir les résistances de vagues et de remous ont été couronnées de succès.

La résistance de frottement, que l'on estime à 80 p. 100 de la résistance globale à la marche du navire, est réduite en utilisant l'un ou l'autre des nombreux revêtements de coque disponibles. On trouve les peintures antisalissures

a) à motrice soluble, dont les qualités tropicales et super-tropicales sont les exemples les plus connus
b) celles dites "peintures à contact" et décrites comme "longue durée" et
c) celles à résines copolymères autopolissantes.

L'affaiblissement des résistances de vagues et de remous a été rendu possible par la mise en place de bulbes à l'étrave et à l'arrière. Celles-ci réussissent à atténuer les systèmes de vagues qui, par l'énergie qu'ils font dépenser au navire, contribuent à gaspiller le carburant. Les bulbes d'étrave sont apparus il y a plusieurs années déjà et c'est le professeur japonais Inui qui, récemment, a lancé l'idée des bulbes d'étambot.

7. EXPLOITATION DU NAVIRE

Au niveau de l'exploitation, il existe plusieurs moyens d'améliorer la consommation d'un navire, notamment le contrôle serré des performances du navire et de son comportement dans le milieu où il évolue, en vue de la prise de décisions éclairées et judicieuses.

Le moyen le plus simple est la marche lente que permet une exploitation libre de la contrainte des horaires fixes. Mais l'ampleur des gains réalisables de la sorte variera selon que l'installation motrice convient ou non à ce type d'exploitation, c'est-à-dire à une marche à puissance réduite. On sait que le rendement des groupes moteurs et de la propulsion tombe lorsque le régime de marche sort des limites prévues. Mais il est possible d'assortir rendement maximal et vitesse optimale grâce à certaines modifications. Par exemple, mise en place d'une hélice mieux adaptée à la vitesse de marche visée; utilisation d'un système d'injection à calage variable; installation d'injecteurs spéciaux pour moteurs diesel, etc.

Un deuxième moyen de réduire la consommation est d'améliorer la tenue en mer, par exemple, en éliminant toute résistance supplémentaire résultant de manoeuvres de barre excessives et en suivant une route tracée avec précision. Pour cela, on devra recourir aux aides modernes à la navigation et faire que le tirant d'eau et l'assiette du navire restent toujours dans les limites optimales, par un contrôle serré et des calculs précis.

Enfin, l'évitement des zones de perturbations atmosphériques est devenu un des grands moyens d'économiser l'énergie. Ainsi, les capitaines peuvent, dans le but d'accroître la sécurité et d'améliorer la consommation, s'adresser aux experts météorologues qui les aideront, grâce aux moyens modernes dont ils disposent, à établir un itinéraire qui tienne compte des conditions météo ainsi que des caractéristiques du navire considéré.

8. APPLICABILITÉ AUX NAVIRES MARCHANDS CANADIENS

De toutes les mesures d'économies d'énergie ouvertes aux armateurs, quelques-unes sont universellement applicables, d'autres non. L'important, avant de décider pour ou contre telle ou telle mesure, est de définir en détail le profil opérationnel du navire avant même d'opter pour un groupe moteur ou un système de propulsion. Il faut aussi décider selon que le navire que l'on veut équiper de dispositifs d'économie d'énergie est déjà construit ou s'il est encore sur la planche à dessin. Le tableau 1 dresse la liste de toutes les mesures envisageables et donne, en regard, la fourchette des économies réalisables ainsi que leur applicabilité aux différents types de navires marchands canadiens.

Il ne faut pas croire qu'il soit possible d'additionner les résultats indiqués en ajoutant simplement les mesures les unes aux autres. En effet, certaines mesures peuvent avoir pour effet d'annuler les gains apportés par les autres. À l'inverse, il est également vrai que certaines peuvent être indispensables à l'obtention des résultats attendus d'autres mesures complémentaires. Pour qu'un navire puisse être considéré comme énergétiquement efficace, il faut qu'il soit équipé du plus grand nombre de dispositifs d'économie possible, sous réserve qu'ils se complètent les uns et les autres et concourent à un résultat positif démontré par une analyse économique approfondie réalisée au préalable.

Voici quelques observations intéressantes:

a) Le secteur des cargos hors mer canadiens présente un potentiel d'économies élevé.

b) Propulsion à vapeur: à moins de convertir le navire à la propulsion diesel, il faut réétudier la machinerie vapeur pour la moderniser.

c) Propulsion diesel: étudier la possibilité de brûler des combustibles plus lourds; sinon, envisager la possibilité d'utiliser des mélangeurs de combustible comme moyen de réduire la facture énergétique.

d) La tendance actuelle dans le cas des cargos hors mer semble se diriger vers les moteurs diesel lents brûlant des combustibles lourds, en remplacement de la turbine à vapeur. Bien que les moteurs diesel lents apportent la consommation spécifique la plus faible dans le cas des navires hauturiers, c'est la

Tableau 1
Liste des mesures d'économies d'énergie envisageables et applicabilité à la marine marchande du Canada

N°	MESURES D'ÉCONOMIE	ÉCONOMIES RÉALISABLES (%)	APPLICABILITÉ DES MESURES AUX DIFFÉRENTS TYPES DE NAVIRES MARCHANDS CANADIENS*			
			CARGO HORS MER	TRAVERSIER	NAVIRE HAUTE MER	NAVIRE CÔTIER
	Combustibles et traitement					
1.	Conversion aux combustibles lourds	<27	N, R	N, R	N, R	N, R
2.	Homogénéisation	1	R	R	R	R
3.	Mélanges	<9	R	R	R	R
4.	Émulsification	<7	N, R	N, R	N, R	N, R
5.	Traitement chimique	<1	N, R	N, R	N, R	N, R
6.	Déchets de centrifugeage alimentant les chaudières	0,7	N, R	N, R	N, R	N, R
	Moteurs diesel principaux					
7.	Moteur diesel lent, à course longue	<16	N	(N)	N	N
8.	Moteur diesel semi-rapide	<16	N	N	N	N
9.	Conversion des moteurs à la vitesse lente	<3,5	R	R	R	R
	Turbines principales					
10.	Remotorisation en diesel	0 - 33	(R)	-	R	-
11.	Modernisation des turbines à vapeur	<5	R	-	R	-
12.	Amélioration du cycle vapeur:					
	a) économiseur	1 - 3	R	-	R	-
	b) pompe principale d'alimentation à débit plus faible	0,7 - 1,8	R	-	R	-
	c) nombre plus élevé de réchauffeurs d'eau alimentaire à combustion	1,0 - 3,0	R	-	R	-
	d) soutirages de vapeur successifs sur turbine	1,0 - 5,0	R	-	R	-
13.	Brûleurs à rendement plus élevé, en rééquipement sur les chaudières principales et auxiliaires	<3	R	R	R	R
	Hélices et forme de la carène arrière					
14.	Hélice de grand diamètre tournant lentement	<12	N, (R)	N, (R)	N, (R)	N, (R)
15.	Hélice à pas variable	-3 - 10	N	N	N	N
16.	Surface des pales plus lisse	<5,5	N, R	N, R	N, R	N, R
17.	Hélice sans tourbillon d'extrémité	<24	N, R	N, R	N, R	N, R
18.	Hélices contrarotatives	<15	-	(N)	(N)	-
19.	Hélices de type "reaction fin"	<8	N, R	N, R	N, R	-
20.	Uniformisation du sillage	8 - 10	N, R	N, R	N, R	N, R
21.	Hélice à tuyère	<8	N, R	N, R	N, R	N, R
22.	Hélice sous voûte	<2	N, R	N, R	N, R	N, R
23.	Bulbe de gouvernail	<5	N, R	N, R	N, R	N, R

Tableau 1
Liste des mesures d'économies d'énergie envisageables et applicabilité à la marine marchande du Canada

N°	MESURES D'ÉCONOMIE	ÉCONOMIES RÉALISABLES (%)	APPLICABILITÉ DES MESURES AUX DIFFÉRENTS TYPES DE NAVIRES MARCHANDS CANADIENS* CARGO HORS MER	TRAVERSIER	NAVIRE HAUTE MER	NAVIRE CÔTIER
	Systèmes auxiliaires					
24.	Génératrices entraînées par le moteur principal	2	N	N	N	N
25.	Récupération de la chaleur des gaz d'échappement	7,0	N	N	N	N
26.	Récupération de la chaleur des fluides de refroidissement	1	N	N	N	N
27.	Récupération de la chaleur de l'air ambiant	1,5	N	N	N	N
28.	Pompes et compresseurs entraînés par le moteur principal	1	N	N	N	N
29.	Pompes à vitesse variable	1	N, R	N, R	N, R	N, R
30.	Utilisation de fluides caloporteurs pour le chauffage	<1	N	N	N	N
31.	Ventilation naturelle de la salle des machines	<1	N	N	N	N
32.	Réduction du nombre de réservoirs de soute	0 - 2	N	N	N	N
33.	Calorifugeage des réservoirs de soute	0 - 2	N	N	N	N
	Forme de carène					
34.	Essais hydrodynamiques en bassin de la carène	1 - 8	N	N	N	N
35.	Peintures antisalissures autopolissantes	2 - 7	N, R	N, R	N, R	N, R
36.	Allégement par utilisation d'un acier haute résistance à la traction	<2	N	N	N	N
37.	Emploi d'alliages légers	<15	(N)	N	-	-
	Exploitation					
38.	Réduction des vitesses par 20 p. 100 ou moins	<30	R	R	R	R
39.	Pilotage automatique de précision	0 - 2	N, R	N, R	N, R	N, R
40.	Évitement des zones de perturbations atmosphériques	-3 - 3	N, R	N, R	N, R	N, R
41.	Optimalisation de tirant d'eau et de l'assiette	2 - 4	N, R	N, R	N, R	N, R
42.	Contrôle serré du moteur principal (ou des chaudières)	2 - 10	N, R	N, R	N, R	N, R
43.	Contrôle de la consommation	0 - 2	N, R	N, R	N, R	N, R

Légende:
* - en neuf - N
  - en rééquipement - R

( ) - Application peu probable
  - Application probable

formule du petit moteur diesel semi-rapide, en relève d'un plus gros, qui sera probablement la plus économique dans le cas des cargos hors mer.

e) La formule de mieux en mieux connue et de plus en plus répandue dans le monde est celle des hélices de grand diamètre, à faible vitesse de rotation, ayant un nombre de pales et une surface des pales réduits et un fini lisse.

f) Lorsque toutes ces mesures ont été appliquées, comme dans le cas du CANADIAN ENTERPRISE construit à Port Weller, la mise en place d'une hélice de plus grand diamètre sous voûte, travaillant dans un sillage uniformisé, a permis de réaliser des économies de 10 p. 100, par rapport à un navire-jumeau équipé d'une hélice sans voûte, de diamètre plus petit et tournant à vitesse plus élevée.

g) L'emploi d'une hélice à tuyère se répand de plus en plus dans le cas du cargo hors mer canadien. Outre les avantages qui la caractérisent généralement, la tuyère apporte, dans ce cas précis, des avantages supplémentaires comme, par exemple, l'élimination du gouvernail lorsque la ou les tuyères sont orientables. Cela améliore non seulement la manoeuvrabilité du navire, mais accroît la proportion du volume "marchand" du fait que la salle des machines peut être repoussée plus loin vers l'arrière du navire. L'avantage de cette configuration est particulièrement évidente dans le cas d'un cargo hors mer dont la longueur maximale est conditionnée par la longueur des écluses qu'il doit franchir. Dans le cas d'un navire ne souffrant pas d'une telle contrainte, les avantages de la tuyère orientable sembleront moins évidents, compte tenu de l'investissement qu'elle représente et des coûts d'entretien qu'elle réclame.

h) Pour réduire la résistance à la marche, le bulbe d'étrave est un moyen de plus en plus répandu, notamment sur les vraquiers de haute mer, de construction récente et devant naviguer aussi dans les Grands Lacs. Outre l'amélioration hydrodynamique qu'elle apporte, il semblerait qu'elle améliore aussi la tenue du navire dans les eaux chargées de glaces. De toute évidence, ce facteur a pour effet de relever la productivité générale du navire et son rendement financier annuel du fait que la saison de navigation pourra être prolongée.

i) L'emploi de peintures antisalissures autopolissantes réduit encore plus la résistance à la marche. Mais, là, il faut distinguer entre les navires qui doivent naviguer dans des eaux chargées de glaces, comme c'est le cas des cargos canadiens, et ceux qui naviguent les routes maritimes libres de glaces. Étant donné leur faible résistance à l'abrasion, ces peintures offrent des performances amoindries, et très peu de protection, dans la zone de la coque renforcée contre les glaces. Pour remédier à cet état de choses, il faudra enduire cette zone de peintures résistant aux glaces comme l'Inerta 160 ou le Zebron et le reste de la coque de peintures autopolissantes.

9. COMBUSTIBLES ET SOURCES D'ÉNERGIE DE L'AVENIR

L'U.S. Maritime Transportation Research Board de la National Academy of Science a publié la liste des sources d'énergie et des combustibles qui pourraient servir à la propulsion marine (voir le tableau 2). Il recense vingt combustibles ou sources possibles dont il cote le potentiel. Mais, auparavant, voici une explication des termes utilisés dans ce tableau:

- Le terme "direct" signifie que la forme d'énergie considérée est utilisable telle quelle, tandis que "indirect" signifie que sa mise en oeuvre permettrait d'obtenir soit de l'hydrogène, soit des composés hydrogénés.

- Niveau de développement
  - Élevé: Commercialement exploitable
  - Moyen: Fait l'objet d'un projet pilote
  - Bas: Encore au stade de la recherche

- Disponibilité à titre de combustible
  - Élevée: Largement disponible
  - Moyenne: Disponible en quantités mesurées
  - Basse: Pas encore sur le marché

- Emploi sécuritaire à bord:
  - Égal: Au moins égal à celui des huiles résiduelles (GDEL)
  - Moins: Pas aussi sécuritaire

- Compétitivité
  - Élevée: Forte probabilité d'une production à des coûts concurrentiels
  - Moyenne: Faible probabilité d'une production à des coûts concurrentiels
  - Basse: Production à des coûts concurrentiels improbable

- Part prévisible du marché de la propulsion marine
  - Élevée: Grande diffusion dans le domaine considéré
  - Moyenne: Diffusion modérée
  - Basse: Diffusion très limitée sinon nulle

Tableau 2
Classement qualitatif des combustibles et des sources d'énergie de substitution

	Niveau de développement	Disponibilité	Pouvoir calorifique inférieur kJ/kg	Manutention sécuritaire	Sécurité personnel	Part du marché	Adaptabilité des installations de stockage	Installations motrices adaptables à l'horizon 2 000**	Cote horizon 2 000 navires existants	Cote horizon 2 000 navires futurs	Horizon
1. Fuel-oil de synthèse par liquéfaction du charbon	Moyen	Basse	40 500	Égal	Moins	Élevée	Élevée	1,2,3,4	Élevée	Élevée	Élevée	90's
2. Schistes bitumineux	Moyen	Basse	42 300	Égal	Moins	Élevée	Élevée	1,2,3,4	Élevée	Élevée	Élevée	80's
3. Sables bitumineux	Élevé	Moyenne	(42 300)	Égal	Égal	Élevée	Élevée	1,2,3,4	Élevée	Élevée	Élevée	80's
4. Méthanol	Élevé	Basse	20 100	Moins	Moins	Élevée	Moyenne	1,3,4,5	Moyenne	Basse	Basse	90's
5. Mélanges méthanol-charbon 40-60%	Moyen	Basse	23 300 26 000	Moins	Moins	Élevée	Moyenne	4	Basse	Basse	Basse	2 000*
6. Éthanol	Élevé	Moyenne	26 900	Moins	Moins*	Basse	Moyenne	1,3,4,5	Basse	Basse	Basse	actuel
7. Mélanges essence-alcool 90-10%	Élevé	Moyenne	(41 400)	Moins	Moins	Moyenne	Basse	1,3,4,5	Basse	Basse	Basse	actuel
8. Mélanges poudre de charbon fuel-oil 40-60%	Moyen	Basse	36 700 39 500	Égal	Égal	Élevée	Élevée	2,4	Élevée	Moyenne	Élevée	80's
9. Hydrogène	Élevé	Basse	120 000	Moins	Moins	Moyenne	Basse	-	-	-	-	2 000*
10. Ammoniac	Élevé	Moyenne	18 700	Moins	Moins	Moyenne	Basse	-	-	-	-	2 000*
11. Hydrazine	Élevé	Basse	17 000	Moins	Moins	Basse	Basse	-	-	-	-	2 000*
12. Méthane	Élevé	Élevée	50 000	Moins	Moins	Élevée	Basse	1,3,4,5	Basse	Basse	Basse	80's
13. Énergie nucléaire (D)[1]	Élevé	Élevée	S.O.	S.O.	S.O.	Élevée	Basse	1, 4	S.O.	Basse	Moyenne	actuel
(I)[2]	Moyenne	Basse	S.O.	variable	variable	variable	Basse	variable	variable	variable	variable	2 000*
14. Charbon	Élevé	Élevée	27 900 34 900	Égal	Égal	Élevée	Élevée	4	Basse	Basse	Élevée	actuel
15. Bois séché à l'air	Moyen	Moyenne	12 800 18 600	Égal	Égal	Élevée	Basse	4	Basse	Basse	Basse	80's
16. Énergie solaire (D)	Bas	Basse	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	-	-	S.O.
(I)	Bas	Basse	variable	variable	variable	variable	Basse	-	-	-	-	2 000*
17. Énergie marémotrice(D)	Bas	Basse	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	-	-	S.O.
(I)	Bas	Basse	variable	variable	variable	variable	basse	-	-	-	-	2 000*
18. Énergie éolienne (D)	Élevé	Élevée	S.O.	S.O.	S.O.	Basse	Basse	S.O.	S.O.	Basse	Moyenne	actuel
(I)	Moyen	Basse	variable	variable	variable	variable	Basse	-	-	-	-	2 000*
19. Énergie thermique des océans (D)	Bas	Basse	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	-	-	S.O.
(I)	Bas	Basse	variable	variable	variable	variable	Basse	-	-	-	-	2 000*
20. Énergie de la houle et des vagues (D)	Bas	Basse	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	-	-	S.O.
(I)	Bas	Basse	variable	variable	variable	variable	Basse	-	-	-	-	2 000*

(1) D = direct; (2) I = indirect; 1: Turbine à gaz; 2: diesel et piston libre; 3: moteur à combustion interne à pistons; 4: vapeur; 5: pile à combustible; S.O.: sans objet; ( ): chiffres estimatifs; *: dénaturé; **: voir l'étude MTRB; -: improbable à l'horizon 2 000

- Adaptabilité: Possibilité d'adaptation aux installations de stockage existantes et d'acceptation par les organismes de réglementation et de classification
  - Élevée: Adaptable avec peu ou pas de changements
  - Moyenne: Adaptable avec d'importants changements
  - Basse: Exigera d'importantes modifications au navire ou aux installations de stockage au point d'annuler les avantages économiques escomptés

- Classement général: Ce classement tient compte de tous les critères d'appréciation, applicables aux navires existants ou en construction

- Horizon: Indique la décennie durant laquelle le carburant considéré devrait être disponible en quantités commerciales.

La figure 1 classe les combustibles de substitution selon leur coût. Le montant indiqué représente les coûts affichés de production et auxquels il conviendrait d'ajouter les coûts de stockage, de transport et de distribution, chose qui n'a pas été faite vu les incertitudes qui caractérisent ces éléments de coût.

Dans le cas de l'hydrogène, du méthane et du gaz naturel, il y a lieu d'ajouter, en outre, le coût de la liquéfaction étant donné que presque toutes les utilisations nécessitent cette transformation.

Une autre pratique pour comparer les combustibles de substitution consiste à en déterminer le rendement thermique global: rapport entre l'énergie transmise à l'arbre et l'énergie potentielle contenu dans une quantité mesurée du combustible. De la sorte, on tient compte de toutes les pertes dues à toutes sortes de facteurs en jeu: transformations, transport, imbrûlés, pertes dans le moteur, etc. Le rendement thermique global de certains combustibles est donné à la figure 2.

Enfin, la figure 3 classe les combustibles en fonction du coût de l'énergie électrique produite à partir de ceux-ci. Ces coûts ne sont pas seulement les coûts directs de production; ils tiennent également compte du facteur temps: le temps durant lequel l'énergie libérée est disponible. La figure 3 peut servir en outre à illustrer le coût relatif des installations motrices dont le travail fourni servirait directement à la propulsion marine.

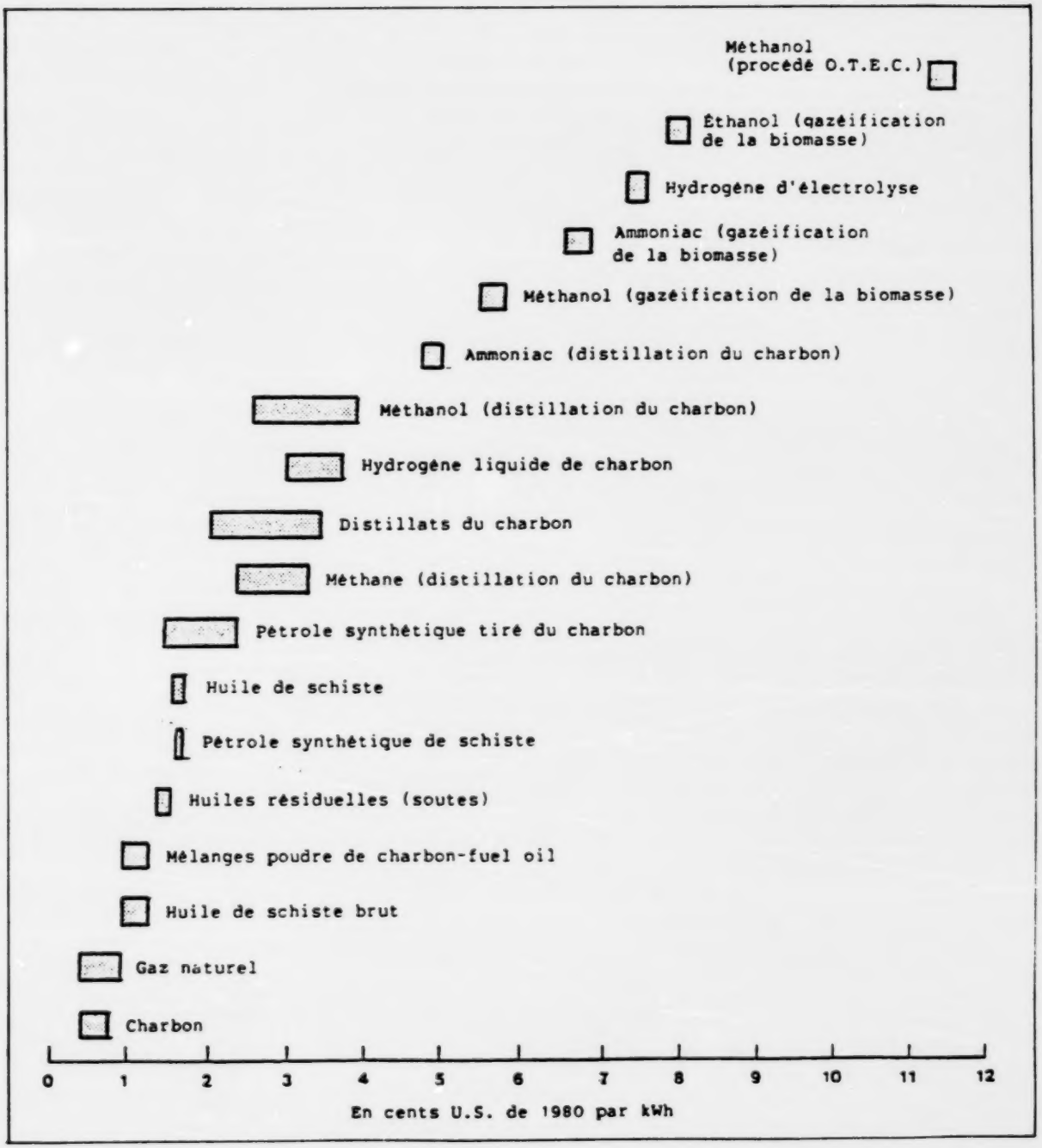

Figure 1 Classement des combustibles selon le coût de production

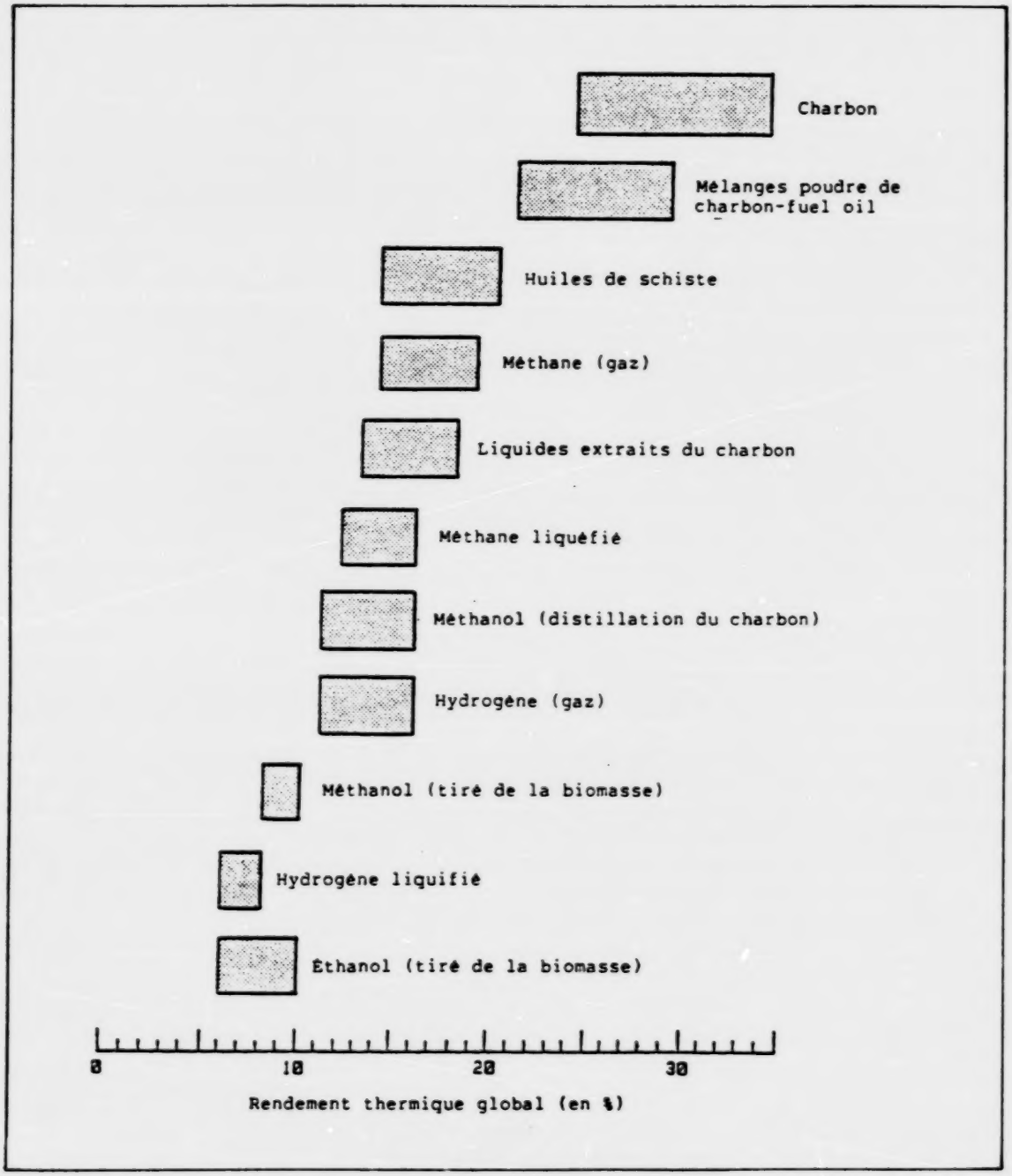

Figure 2 Rendement thermique global
(Rapport entre l'énergie potentielle à la source et la puissance disponible sur l'arbre d'une turbine à vapeur)

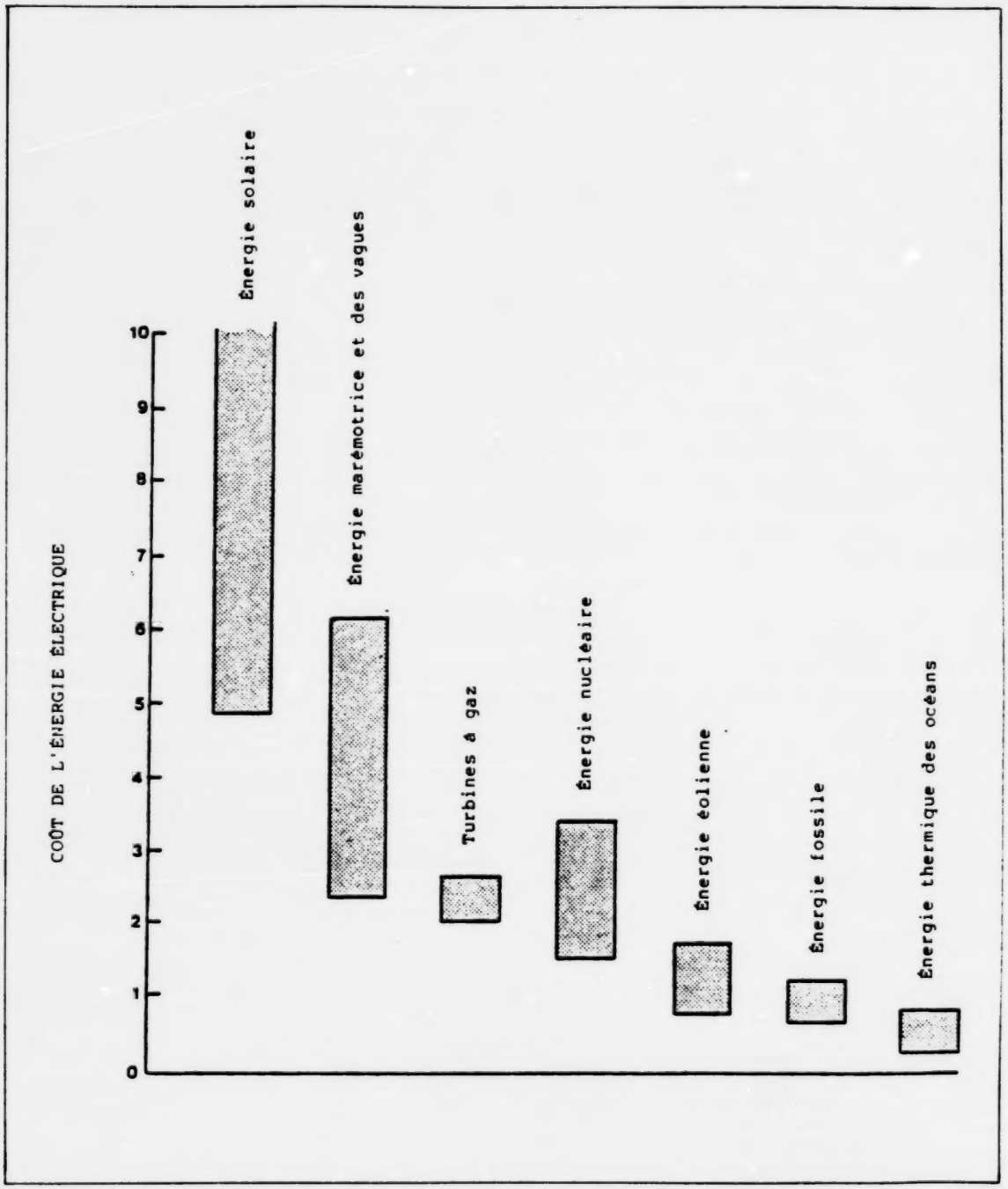

Figure 3 Classement des sources d'énergie en fonction du coût de production d'énergie électrique

10. SYSTÈMES ET APPAREILS PROPULSIFS DE L'AVENIR

Devant une telle gamme de combustibles de substitution possibles, les perspectives ouvertes au développement de systèmes et d'appareils propulsifs sont vastes. Certains combustibles sont immédiatement utilisables pour la propulsion marine, alors que d'autres ne sont que de vagues propositions sans possibilité de réalisation concrète dans un avenir plus ou moins lointain.

Certains navires de construction récente ont été équipés d'appareils propulsifs brûlant du charbon. Le bien-fondé d'un tel choix dépend surtout de l'écart de prix entre le charbon et le pétrole. Pour le moment, le prix du charbon ne lui permet pas de concurrencer le pétrole dans le domaine de la propulsion marine, mais il se peut que cet écart s'atténue, et alors les armateurs ayant mis au point cette technologie se verront avantagés.

Le seul moyen actuellement disponible sur le marché pour libérer l'énergie renfermée dans le charbon est constitué par la chaudière où le charbon est brûlé pour produire de la vapeur qui fait tourner une ou des turbines. Un autre moyen est celui de la turbine à gaz fonctionnant en circuit fermé où le fluide moteur est chauffé par du charbon. C'est là un moyen beaucoup plus économique et où le rendement est beaucoup plus élevé. Le moteur à cycle de Stirling brûlant du charbon constitue, lui aussi, un moyen prometteur, mais pour l'instant c'est la turbine à gaz qui semble avoir atteint un stade de développement plus avancé.

La recherche de moteurs thermiques à rendement élevé capables de brûler des carburants dégradés est aidée par l'étude de chaudière à lit fluidisé dont l'application éventuelle à la propulsion marine encouragerait la recherche sur des systèmes propulsifs de type avancé, tels que le moteur à cycle de Stirling, la turbine à gaz à circuit fermé et les moteurs fondés sur d'autres cycles théoriques. Mais leur mise au point dépendra avant tout de la découverte de matériaux résistant à des températures de service élevées.

Quant à l'énergie nucléaire, elle ne se justifie en propulsion marine que pour des applications particulières, la navigation dans les hautes latitudes, par exemple. On sait que l'U.R.S.S. met en oeuvre des brise-glace propulsés par l'énergie nucléaire. Dans les pays industrialisés occidentaux, il existe une forte opposition à l'utilisation de navires à propulsion nucléaire de quelque catégorie que ce soit, motivée par des préoccupations écologiques. Sur le

plan technique, cependant, rien ne s'oppose à la réalisation de ce type de navires, la technologie étant au point et largement utilisée pour la propulsion de bâtiments de guerre. Quant aux investissements à consentir et aux coûts d'exploitation, on se heurte à des incertitudes, vu que le prix du combustible nucléaire est régi plus par des considérations politiques que par la loi de l'offre et de la demande. On croit savoir, cependant, que le marché des combustibles nucléaires sera serré, rendant peut-être nécessaire l'utilisation de réacteurs surrégénérateurs rapides. Ce matériel à destination terrestre est aux premiers stades de son développement et aucun n'a, par ailleurs, servi pour la propulsion marine.

L'utilisation de procédés de conversion directe de l'énergie chimique en énergie électrique pour la propulsion marine, tels que la pile à combustible, est considérée peu probable dans un avenir rapproché, mais ces procédés ne devraient pas être écartés pour autant si on considère un horizon plus lointain.